

*IX Международная научно-техническая конференция
«Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах»*

УДК 669.162.212

**ОБ УДАЛЕНИИ ВОДОРОДА ИЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ
ФЛОКЕНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ**

Бойченко С. Б.¹, Бойченко Б. М.², Синегин Е. В.³, Молчанов Л. С.⁴

Приведены схема размещения в днище промежуточного ковша МНЛЗ, конструкция и режимы эксплуатации пористых продувочных блоков, предназначенные для улучшения качества разливаемых флокеночувствительных сталей.

Актуальность исследования

Промежуточный ковш (промковш) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) всё в большей степени становится завершающим рафинирующим жидкую сталь звеном, в том числе и от водорода, непосредственно перед её кристаллизацией [1]. Эффективность технологических операций по удалению водорода, неметаллических включений и гомогенизации жидкой ванны в значительной степени зависит от состава контактирующих с металлом фаз: футеровки, шлака, газа – и от характера развития и стабильности потоков жидкой стали в промковше.

Изучение и создание с этой целью необходимой обстановки пребывания жидкой стали в промковше обеспечат высокое качество непрерывнолитой заготовки.

Постановка задачи исследования

При отслеживании поэтапного изменения содержания водорода в флокеночувствительных сталях содержание водорода [H] авторы обнаружили следующее. При исходном [H] = 5,0 ppm перед дегазацией его концентрация при вакуумировании постепенно снижается до 0,5 – 1,0 ppm, однако возрастает до 4,0 ppm в промковше на первых 5 плавках разливаемых серий и нестабильно колеблется в пределах 1,5 – 2,5 ppm на плавках последующих. Таким образом, «виновниками» возрастания [H], прежде всего на первых плавках в серии, и связанной с этим отбраковки по флокенам являются условия пребывания стали в промковше.

Настоящая работа направлена на устойчивое снижение [H] перед кристаллизацией – ниже уровня 2,0 ppm, исключающего риск отбраковки заготовки по флокенам, с одновременным очищением стали от трудноудаляемых крупных неметаллических включений.

¹НМетАУ, соискатель

²НМетАУ, докт. техн. наук, профессор,

³НМетАУ, аспирант

⁴НМетАУ, канд. техн. наук, доцент

Повышение расхода аргона, вдуваемого в жидкую сталь, является средством удаления из неё водорода за счёт разницы его парциальных давлений в металле и пузырьке газа и перемешивания, что ускоряет коагуляцию, всплытие неметаллических включений в шлак и стабилизирует жидкие потоки по составу и температуре.

Однако вдувание аргона и гидродинамика расплава в проковше должны исключать обратный захват и вовлечение в потоки стали неметаллических включений из шлака.

Результаты исследования

Провели моделирование процессов в физической изотермической модели проковша, изготовленной в масштабе 1:10 в соответствии с линейными размерами прототипа емкостью 38 т по критерию Фруда Fr. Сталь имитировали водой, шлак – бензолом (C_6H_6) марки “ПС” по ГОСТ 9572 – 93. По характеру смачивания этими жидкостями неметаллических включений определен имитатор включений – тонкодисперсный графит. Подачу нейтрального газа моделировали использованием воздуха. Получили вероятное распределение векторов скоростей потоков жидкой стали при различном расположении пористых продувочных блоков. Целью планирования экспериментов в соответствии с π -теоремой являлась организация потоков жидкости в проковше за счет режимов донной подачи аргона с тем, чтобы они распространялись в верхних горизонтах преимущественно вдоль зеркала по направлению от металлоприемника к торцам проковша и в обратном направлении к стаканам-дозаторам тоже преимущественно в нижних горизонтах.

Зафиксирована (рис. 1), как и в работе [2] картина воздействия потоков жидкости и газа, при которой над дутьевым устройством поднимается “султан” воды (расплава), с которого стекает бензол (шлак). В обычных условиях эксплуатации проковша слой шлака относительно тонкий и может быть легко отодвинут в сторону с оголением расплава и образованием так называемого “глаза” круглой формы с гораздо большей поверхностью, чем “султан” (рис. 2). Установлено [2], что скорость обратных потоков $W_{об.}$ связана со скоростью потоков газожидкостной смеси вверх над дутьевым устройством $W_{г.ж.}$ зависимостью:

$$W_{i\dot{a}} = \frac{S_c}{(S_{\dot{a}} - S_c) \cdot \cos\theta} \cdot W_{\dot{a}\dot{a}}, \quad (1)$$

где S_c и $S_{\dot{r}}$ – соответственно площадь “султана” у межфазной границе жидкость – газ и оголенной жидкости (“глаза”).

Скорость потоков жидкости $W_{г.ж.}$ у зеркала металла, по нашим данным, не превышает 0,015 м/с, а угол θ изменяется в пределах 18 – 20°, то есть $W_{об.} \leq 0,015$ м/с и активных перемешиваний металла со шлаком и вовлечения неметаллических включений вниз не

происходит. Расчёты показали, что скорость всплывания крупных включений (более 60 мкм), существенно превышает величину $W_{об}$.

Следует подчеркнуть, что оголение металлического расплава площади S_r в рассматриваемом случае не приведет к окислению его газовой фазой, обычно имеющего место на установках ковш-печь, из-за наличия достаточно стабильного демпферного слоя аргонной защиты над ним, удерживаемой крышкой промковша.

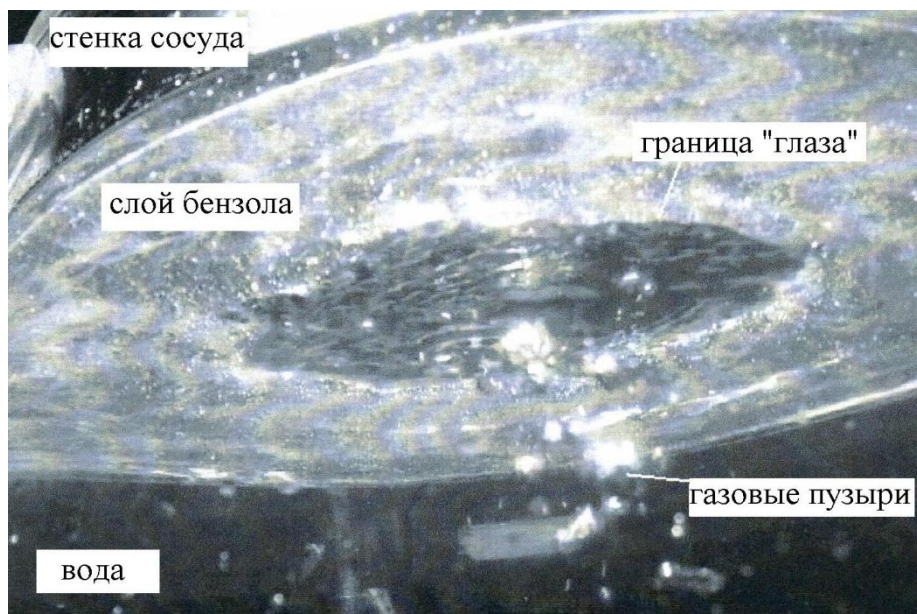


Рис. 1 – Оголение поверхности воды (имитация жидкой стали) от бензола (жидкого шлака).

Фото выполнено снизу под углом 60° к горизонтали

Гидродинамику расплава в промковше шестиручьевой МНЛЗ применительно к разливке флокочувствительных высокопрочных сталей уточняли с использованием прикладного программного пакета “AnsysFluent14.0”. Использовали встроенную $k-\epsilon$ модель турбулентности, позволяющую получить адекватную картину потоков в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Прикладной пакет “Ansys” реализует CFD (ComputationalFluidDynamics) технологию моделирования [3].

CFD базируется на управляющих уравнениях гидродинамики, представляющих собой математические операторы физических законов: сохранения массы жидкости; второго закона Ньютона (изменение импульса равно сумме сил, действующих на жидкость); первого закона термодинамики (изменение энергии равно сумме дополнительных теплоты и работы, выполняемых над жидкостью).

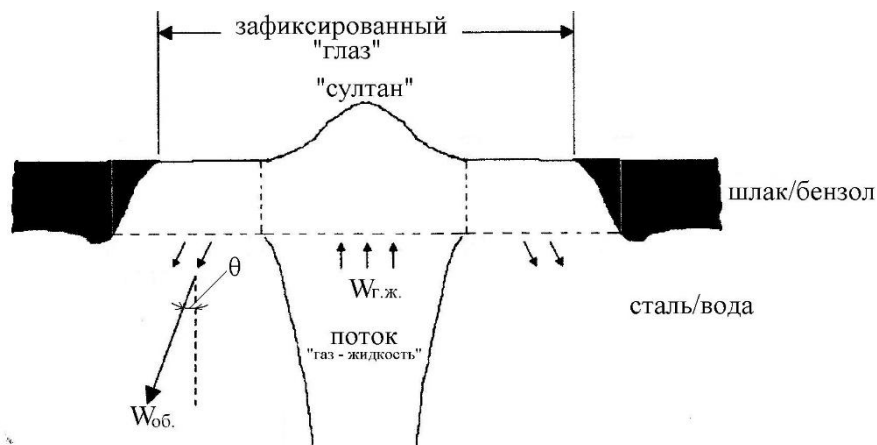


Рис. 2 – Схема процессов стекания бензола (шлака) с поверхности “султана” воды (жидкой стали) и вовлечения части бензола в обратные потоки

Математическое моделирование дополнило схему целесообразной гидродинамики при перемещении стали в проковше (рис. 3-4), расположения дутьевых устройств, их конструкцию, режимы подачи аргона от плавки к плавке в непрерывной серии для стабильного получения содержания $[H] \leq 2 \text{ ppm}$, векторов скоростей и суммарной скорости потоков расплава, неметаллических включений и пузырьков газов. Изменяли входные параметры для расчётов в соответствии с результатами физического моделирования и исходя из собственного практического опыта.

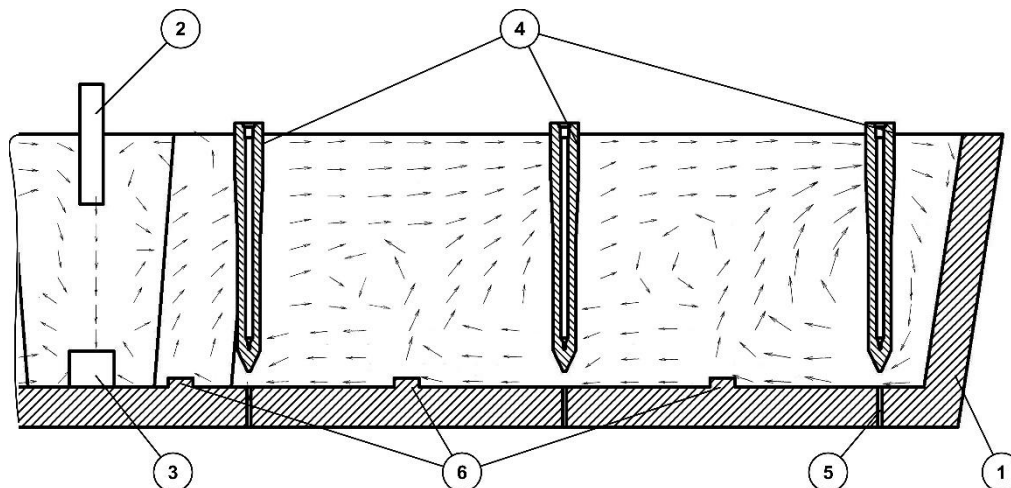


Рис. 3 – Схема циркуляционных потоков жидкой стали в проковше МНЛЗ предложенной конструкции: 1 – проковш; 2 – защитная труба; 3 – турбостоп; 4 – стопоры; 5 – разливочный стакан; 6 – продувочные блоки

Исходной информацией для создания геометрической модели расчётной области выступал шестиручьева проковш, оборудованный системой подвода аргона для вдувания

в жидкую сталь, огнеупорными порогами и металлоприёмником (типа “turbostop”) ведрообразного типа. В качестве расчётной области при создании геометрической модели принят внутренний объём промковша, занимаемый жидкой сталью.

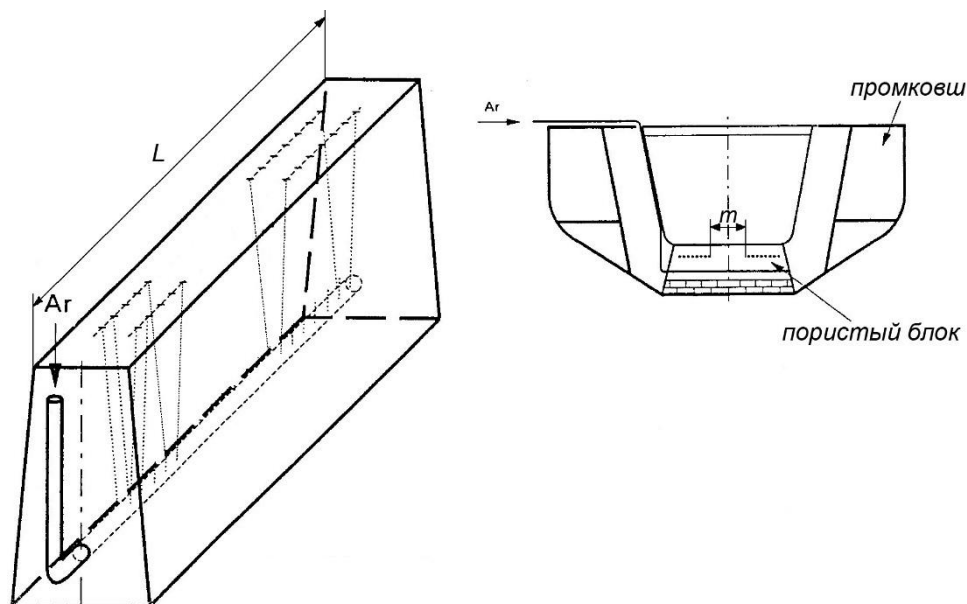


Рис. 4 – Конструкция продувочного блока промежуточного ковша

Организация гидродинамики потоков стали в промковше в соответствии с рис. 3 за счёт режимов донной подачи аргона обеспечивает достижение поставленной при физическом и математическом моделировании цели.

При такой схеме потоки расплава многократно обрабатываются аргоном для удаления водорода и транспортировки неметаллических включений к слою шлака.

Этому в определённой мере способствует новая конструкция продувочного блока (рис. 4), не имеющая пор для подачи аргона по обе стороны от оси промковша на расстоянии $m = \frac{1}{3}L$.

Интенсивность подачи аргона I_{Ar} в промковш через донные пористые устройства должна быть максимальной на первых 1-5 плавках непрерывной серии при разливке флокеночувствительных сталей и уменьшаться по мере снижения, как нами обнаружено, приходной части материального баланса водорода вследствие дообжига футеровки, составляющих шлака жидким металлом и появления над ним аргонной прослойки, защищающей от контакта с атмосферой.

После статистической обработки данных промышленного производства флокеночувствительных сталей разработаны следующие рекомендации для определения интенсивности продувки аргоном в пузырьковом режиме сквозь пористые блоки I_{Ar} . При

разливке первой плавки в серии продувку осуществляют с расходом аргона $7,1 \div 7,8$ $\text{дм}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$, при разливке следующих четырёх плавов расход аргона I_{Ar} на 1 т ёмкости проковша выдерживают в соответствии с уравнением

$$I_{\text{Ar}} = (7,1 \div 7,8) \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot n \cdot a \times b \cdot V \cdot \tau}}, \text{ дм}^3/(\text{т} \cdot \text{мин}), \quad (2)$$

где $7,1 \div 7,8$ – удельный расход инертного газа при разливке первой плавки, $\text{дм}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$; E – ёмкость сталеразливочного ковша, т; ρ – плотность твёрдой стали, $\text{т}/\text{м}^3$; n – число рабочих ручьёв МНЛЗ; $a \times b$ – соответственно толщина и ширина заготовки, м; V – рабочая скорость вытягивания заготовок, м/мин; τ – длительность разливки, мин.

А при разливке последующих плавов и до конца серии I_{Ar} сохраняется в пределах $3,2$ – $3,5$ $\text{дм}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$.

Заключение

С привлечением методов физического и математического моделирования, статистической обработки результатов непрерывной разливки флокеночувствительных сталей разработана схема размещения и режимы эксплуатации пористых продувочных блоков, а также конструкция последних, устанавливаемых в днище промежуточного ковша МНЛЗ. Это обеспечивает удаление водорода и относительно крупных неметаллических включений из жидкой стали перед поступлением в кристаллизаторы.

Библиографический список

1. Бойченко С. Б. Механизм и кинетика процессов, определяющих содержание водорода в стали в промежуточном ковше МНЛЗ / С. Б. Бойченко, Ю. С. Пройдак, Б. М. Бойченко // Процессы литья. – 2013. – № 3. – С. 29-32.
2. Krishnakumarand K. A Model Study of Slag Eye Formation during Gas Purdingat the Surface of a Mettal Bath / K. Krishnakumarand, G.A. Jrons // The 3rd International Congress on the Science and Technolodgy of Steelmaking (Charlotte, 9-12 May 2005 y.) – Charlotte, 2005. – P. 833-844.
3. Jiguan Tu Computational Fluid Dynamics : A Practical Approach / Tu Jiguan, Guan Heng Yeoh, Chaugun Liu. – 2010. – P. 65-105.